

出國報告（出國類別：開會）

赴美參加「2008年國際高放射性廢棄物營運會議」

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：邱顯郎 核能技術組長

派赴國家：美國

出國期間：97.9.6-13

報告日期：97.11.10

QP-08-00 F04

## 摘要

美國核能學會於 97 年 9 月 7-11 日在拉斯維加斯舉辦「2008 年國際高放射性廢棄物營運會議」，參加國家包括美國、法國、英國、瑞典、瑞士、德國、日本、西班牙、芬蘭、加拿大、澳大利亞、紐西蘭、捷克、台灣等國家。出席者包括各核能主要國家高放射性廢棄物營運之政策制訂單位、管制機關、執行機構等。

該國際會議為一個討論關於核子燃料循環「後端」之科學、技術、社會與法規等相關概念的研討會，會議議題除包括技術性論文發表外，美國能源部發表「雅卡山高放射性廢棄物處置發展概況更新」、韓國核能研究所發表「高放射性廢棄物營運」、瑞士放射性廢棄物處置專責機構發表「深層地質處置選址分段計畫」及責任義務等。

# 目次

	(頁碼)
一、目的 .....	1
二、過程 .....	1
三、心得與建議事項 .....	12

## 壹、 目的

瞭解目前國際上核能後端營運之最新技術研發成果、運轉經驗及規劃現況等，以做為我國未來推動相關業務之參考。

## 貳、 過程

美國核能學會於 97 年 9 月 7-11 日在拉斯維加斯舉辦「2008 年國際高放射性廢棄物營運會議」，參加國家包括美國、法國、英國、瑞典、瑞士、德國、日本、西班牙、芬蘭、加拿大、澳大利亞、紐西蘭、捷克、台灣等國家。

本次會議之全體會議部分係由美國能源部放射性廢棄物管理辦公室主任、韓國核能研究所高放射性廢棄物處置處長、法國國家放射性廢棄物管理局長、中國原子能機構系統工程處長、瑞典核燃料供應公司董事長共同主持。

會議議題除包括技術性論文發表外，美國能源部發表「雅卡山高放射性廢棄物處置發展概況更新」、韓國核能研究所發表「高放射性廢棄物營運」、瑞士放射性廢棄物處置專責機構發表「地質處置選址分段計畫」及責任義務等，其主要內容摘述如下：

### 一、 美國雅卡山高放射性廢棄物處置發展概況更新

#### 1. 里程碑

- 1987 年美國國會通過放射性廢棄物政策法之修正案(即 NWPA/AA)，總統核准以 Yucca Mountain 進行場址特性調查，稱為雅卡山計畫(YMP)。
- 1998 年 YMP 完成了適合性評估報告(Viability Assessment Report)。
- 1999 年 7 月 YMP 提出環境影響說明書。
- 2001 年能源部向 NRC 提交興建許可申請書。
- 美國參議院於 2002 年 7 月 9 日以 60 對 39 票通過內華達州雅卡山為民用高放射性廢棄物最終處置場。
- 2004 年 7 月聯邦法院對美國環保署(EPA)制定的 40 CFR Part 197 規定輻射防護基準為 1 萬年之法案，裁決無效。

- 2005 年 8 月 EPA 公告將輻射防護基準訂為 1 百萬年。
- 2005 年 3 月中旬，美國能源部的律師發現美國地質調查所 (USGS) 進行雅卡山計畫的水文地質模擬工作人員，在 1998 年至 2000 年間的約 20 封電子郵件有疑義，討論到可能有對事實作錯誤表達，故影響到處置場執照審核。
- 2006 年 6 月將雅卡山接收放射性廢棄物時程修訂為 2017 年 3 月，擱棄 2004 年所訂定之接收時程為 2010 年。將申請建造日期由 2004 年 12 月修改為 2008 年 6 月。
- 2008 年 6 月能源部提送環境影響評估報告補充資料。
- 2008 年 6 月能源部向核管會提送執照申請文件。
- 2009 年 10 月開始建造內華達州鐵路運輸系統。
- 2011 年 9 月最終處置場建造執照獲核管會審查通過。
- 2013 年 3 月提送最終處置場運轉執照申請文件。
- 2017 年 3 月啓用最終處置場。

## 2. 預算

處置系統全壽命周期之成本 (Total System Life Cycle Cost) 估計，處置對象包括全美民用之用過核燃料及國防用之高放射性廢棄物，費用含蓋自 1983 年迄今已經使用之花費及未來到 2133 年處置場封閉前所需之費用。依據美國能源部 2001 年 5 月之評估報告，處置系統全壽命周期之費用為 575.2 億美元 (2000 年價位)；依據 2008 年 7 月之評估報告，處置系統全壽命周期之費用為 961.8 億美元 (2007 年價位)。

爲了與 2001 年所作之估計值做比較，961.8 億美元換算爲 2000 年價位爲 793.4 億美元，所以 168.4 億美元之差額係由於 2000 年到 2007 年之物價上漲所致。用過核燃料數量 (109,300 公噸) 係包括目前已獲核管會核准 47 部延役機組所產生之所有用過核燃料，但不包括未來新機組及未來核准延役機組所產生之用過核燃料。

## 二、韓國高放射性廢棄物營運

韓國目前有 20 座核能發電廠在營運中，包括 4 座重水式反應器(CANDU)及 16 座壓水式反應器(PWR)，依照政府對電力需求與供應的長期計畫來看，未來在 2020 年之前，將會再增加 8 座機組參加運轉。

這 20 座機組所產生的用過核燃料量目前已累積達 9,420 噸，預計在 2020 年以前將累積達 20,000 噸用過核燃料，而目前用過核燃料皆存放於核電廠內。爲了將來處理用過核燃料的長遠發展著想，必須解決這項根本問題，故韓國從 1997 年即展開高放射性廢棄物(HLW)處置技術的研發計畫。這項計畫的主要目的在建立一個具長期安全性的高放射性廢棄物處置場之參考系統，並驗證應用於此處置場的關鍵技術，這項計畫預計在 2011 年前完成。

爲了發展一個安全且可行的處置系統，有必要將此系統置於地下的地質環境作驗證，所以韓國建造了一個小規模的地下研究設施，主要目的是以不使用放射性物質的情況下，研究各種水文地質及地球化學的相關行爲。

#### 1. 處置場的設計基準：

隧道及鑽孔之間距係以用過核燃料之衰變熱爲計算基礎，對壓水式反應器用過核燃料而言，每一密封鋼筒假設產生 1,540W 的衰變熱，對重水式反應器用過核燃料而言，每一密封鋼筒產生 760W 的衰變熱，平行隧道間的距離爲 40 公尺。而密封鋼筒的表面溫度以不超過 100 度 C 來進行設計分析。這些假設係以現有的密封鋼筒設計及熱傳分析爲基準來作評估。重水式反應器用過核燃料的冷確時間經計算需 30 年，而壓水式反應器用過核燃料則需 40 年，依據這些計算結果，建議 2040 年首先直接最終處置重水式用過核燃料密封鋼筒，之後在 2065 年直接最終處置壓水式用過核燃料密封鋼筒。在 2040-2049 年期間，直接處置重水式用過核燃料數量每一年漸增，之後每年維持處置 146 筒用過核燃料的速率，直到 2065 年。壓水式用過核燃料處置速率爲每年 380 個密封鋼筒，處置的概念設計是以整個營運時間假設爲 55 年作爲設計基準。

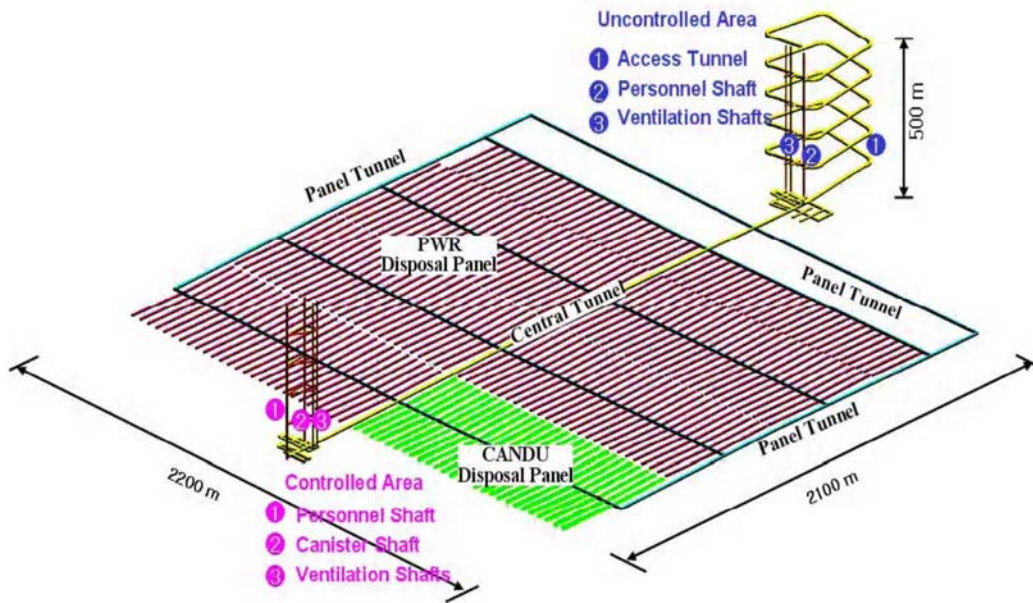
#### 2. 處置場的概念描述：

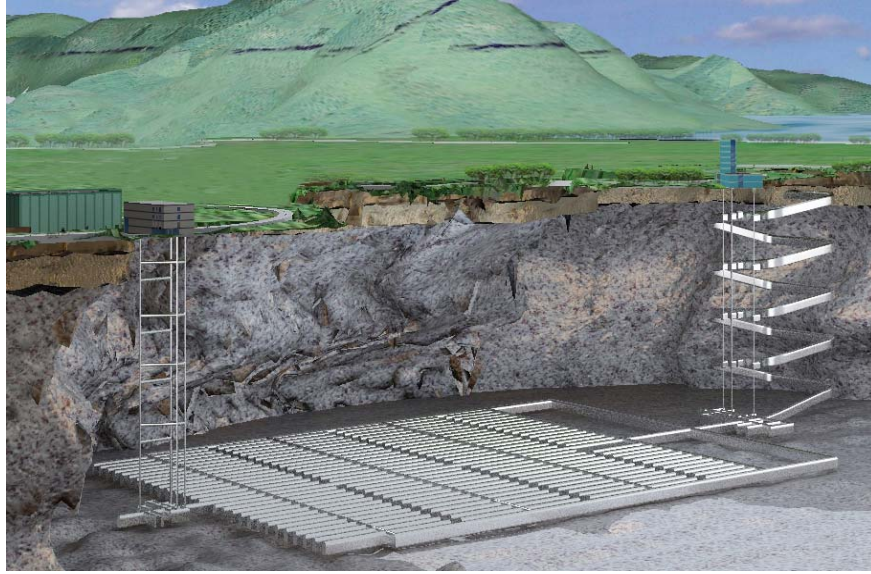
假設最終處置場是沿著韓國半島海岸建造，而最終處置場的深度大約在地下 500 公尺左右，以此概念為基礎，透過初步的如熱傳方面及物理結構方面的數值模擬分析結果，提供最終處置場的佈置圖、高放射性廢棄物處置的概念。

有兩種方式可連結地表設施及地下最終處置場;(1)垂直豎坑(2)傾斜的隧道，傾斜的隧道對運送人或物質都很方便；而基於通風的考量，垂直豎坑明顯優於傾斜的隧道。地下處置場須包含下列部份：

- 用過核燃料密封鋼筒處置區域
- 與地表管制區相連結的技術空間
- 與地表非管制區相連結的技術空間

處置區域包含處置隧道、周邊隧道及中央隧道，且這三個隧道是相連結的，而中央隧道從管制區域導入連接非管制區域，接到周邊隧道，再與其處置隧道相連。位於管制區的技術空間含括四個豎坑：一個密封鋼筒豎坑、一個人員進出豎坑、兩個通風豎坑。位於非管制區的技術空間也包含一個通道隧道、一個人員進出豎坑及兩個通風豎坑，詳細如下示意圖。





兩個處置壓水式用過核燃料隧道最小間距為 6 公尺，兩個處置重水式用過核燃料隧道最小間距為 3 公尺，而為改善隧道間岩石物理上的穩定性，將距離增加至 4 公尺。上圖顯示將用過核燃料作直接處置的最終處置場構圖。

下列所假定的設計因素將適用於上述最終處置場的構圖設計：

- 最終處置場將分為管制區及非管制區，密封鋼筒的吊卸均在管制區內進行，而開挖及回填程序將在非管制區內完成。
- 管制區及非管制區中間的界線將在最終處置場的運轉期限內有所移動。
- 處置隧道及周邊隧道將在最終處置場的營運階段繼續進行開挖及回填施工。
- 通道隧道是與地表間的一個連結通道。

管制區域在左邊，非管制區域在右邊，而用過核燃料密封鋼筒的處置從左邊起始，再轉至右邊處理，密封鋼筒包含兩種材質，內部鑄鐵，外部鍍銅，而 CANDU 和 PWR 用過核燃料的密封鋼筒尺寸是相同的。緩衝阻塞物將以高壓方式將其塑成鳳梨環及圓盤的形狀，因為呈鳳梨環形狀的阻塞物更容易夾住環的內部，因此吊卸起來也較容易。



### 3. 處置場建造、營運及封閉之概念描述：

用過核燃料最終處置場的建造將以地下研究實驗室的建造為起點，當處置場第一個部份建造完成後，則進行下一個建造步驟，進行所有 CANDU 用過核燃料密封鋼筒的處置隧道的開挖，而有一排的 PWR 用過核燃料密封鋼筒隧道也會同時進行開挖，以避免將來開挖時過於接近 CANDU 用過核燃料密封鋼筒處置隧道。當開始營運後，剩下的用過核燃料密封鋼筒將按照五個階段在管制下以爆破的方式進行開挖。在營運期間，將監控各式各樣的參數及變量，這不僅是爲了長期的安全分析，也是爲了發展回填技術、物料、開挖方式等等。監控的項目將會是空氣的品質、水質、水量、回填物料及緩衝物的膨脹壓力、壓力區、隧道中受到干擾的區域等等。處置孔在用過核燃料密封鋼筒放入後隨即以膨潤土密封阻隔，而將利用高壓將此阻塞物塑成鳳梨環狀及圓盤狀，阻塞物的厚度在 0.5 公尺左右。

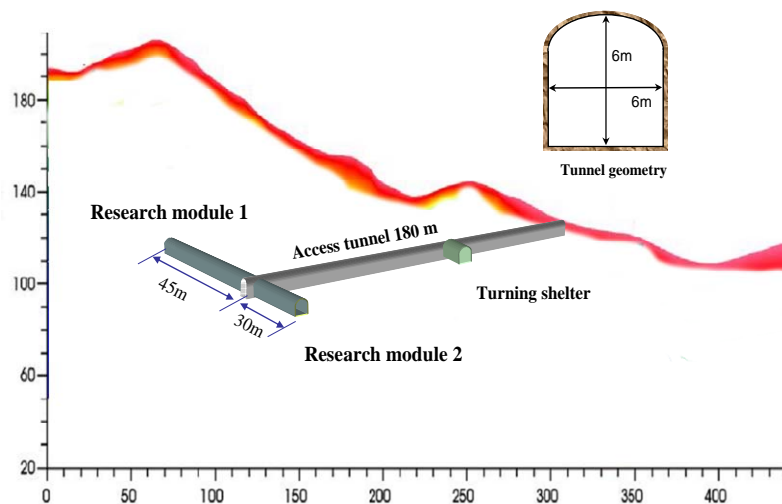
所有隧道及豎坑所使用的回填物料爲百分之七十的碎石混合百分之三十的鈣膨潤土，處置隧道在放入用過核燃料密封鋼筒後，隨即進行回填的動作，碎石的大小在 0-20mm 之間，而回填的技術需和回填的物料必須共同發展。目前，有以下之假定原則：

- 經過開挖產生的淤泥碎石需以地表上的機器設備進行碾壓。
- 碎石及鈣膨潤土需於地表上的混合工作站進行混合。
- 利用混凝土運送車由通道隧道將碎石及鈣膨潤土的混合物運至處置隧道。
- 將一整批回填物料鋪展開，並使其與傾斜的層理緊密結合。

所有處置隧道經過回填之後，隧道口將由混凝土塞密封，混凝土塞將避免回填的物料膨脹及被地下水沖走，且混凝土塞的設計必須是可承受位於處置位置的水壓。在所有隧道及豎坑回填後，10 公尺厚的混凝土塞將被鑄於豎坑的頂部及隧道入口的前方位置。

#### 4. 利用地下研究隧道驗證韓國參考處置系統：

爲了證明所提議之地質處置系統是安全且可行的，韓國建造了一個小規模的地下研究隧道(KURT)，韓國原子能研究所計畫利用 KURT 進行各個現場測試，並藉此檢視高放射性廢棄物處置系統的安全功能。爲了描繪場址的地質特性，在 2003 年進行地表勘查、地震勘查、電阻勘查、坑道鑽孔、以孔內超音波攝影儀器進行坑道觀察及實驗室測試，最後根據場址的特性，於 2004 年完成 KURT 的細部設計，於 2004 年 11 月獲得科學技術部及韓國大田地方政府的建造許可。於 2005 年 3 月始動工，以地下隧道的方式建於韓國原子能研究所的後山，歷經 1.7 年之後於 2006 年 11 月建造完成，KURT 總花費爲韓幣 34 億元(約新台幣 8500 萬元)。隧道深 180 公尺，總長約 255 公尺，斜面坡度 -10%，2 個實驗模組分別置於 2 個隧道端點，詳細如下示意圖。



KURT 2006 年 11 月完工之示意圖



KURT隧道正門

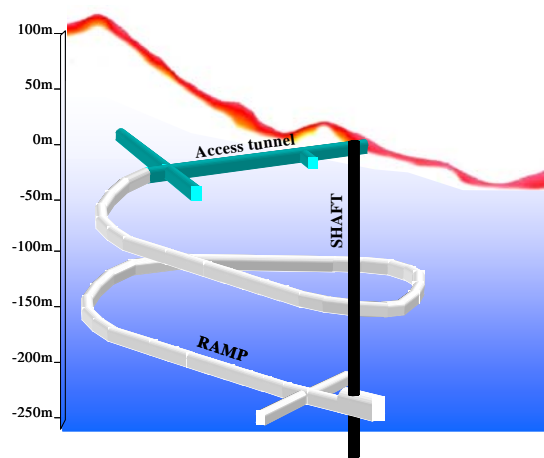


KURT通道隧道



KURT實驗模組

2012 年以後，斜坡式的隧道將繼續往下開挖，直到通氣豎坑達 300 公尺以上，詳細如下示意圖。



5. 韓國地下研究隧道(KURT)場址的運轉：

在地下水文調查的現場測試中，地球化學的情形、岩石群的行爲、非放射性物質在岩石及岩石群間之傳輸、工程障蔽系統之功能、安全評估、最終處置系統的驗證都將於 KURT 中執行。KURT 被歸類爲「一般設施」，故根據現行的法律，任何放射性的物質不可攜入及使用。這樣的研究計畫不僅提供了制訂高放射性廢棄物營運政策所需之資料，透過對地下環境的進一步了解，也可對提高相關研究水平有所貢獻，例如地下空間發展及自然環境的維護。

## 6. 結論：

雖然韓國還未確定任何一個地下的最終處置場址，但一般花崗岩地質的場址被認爲可當作設計最終處置場的參考，並假定最終處置場的位置深度爲 500 公尺。最終處置設施將包含處置區域、位於管制區並與地表連結的技術空間、及位於非管制區並與地表連結的技術空間。爲了驗證所提議的最終處置系統的安全性及可行性，故在 2006 年，位於結晶岩石群區域，以平滑爆破法開挖，建造一個全長 255 公尺的小規模地下研究隧道－KURT。此研究隧道將使用於各個臨場測試，並檢驗高放射性廢棄物處置設施的安全功能，而現場測試包括加熱器測試、地下水流測試、遷移測試、開挖擾動帶測試、深層坑道測試等等，這些現場測試可增進對地下環境的認知及加強社會大眾對放射性廢棄物處置計畫的接受度，並爲建立高放射性廢棄物國家政策提供基本資料及訊息。

## 三、 瑞士放射性廢棄物處置專責機構發表「地質處置選址分段計畫」及責任義務

2005 年瑞士政府制定新的核能法案，闡述的放射性廢棄物最終處置議題，主要著重於強化選址的過程及提供廣泛被接受且過程透明化的民主平台，以逐步方式達成完 3 個階段性任務，而瑞士聯邦能源總署(SFOE)專門負責此「地質處置選址分段計畫」的發展。

該選址分段計畫業經瑞士聯邦總署於 2008 年 4 月 2 日核可，計畫中清楚定義不同利害關係人所扮演的角色、決策過程及決策時所需之資料。第一階段，瑞士國家放射性廢棄物處置

專責機構(以下稱 Nagra) 依據現有知識，負責提出數個地質處置區域及其適合建造、營運、封閉且具長期安全性之有利資料。第二階段，為針對經由 SFOE 核可的(至少兩個)區域進一步評估，除了提供安全分析外，Nagra 也必須提供場址區域的地表設施設計。第三階段，Nagra 依照地表調查結果提出最終處置場址，交由聯邦政府決定並由聯邦議會核准。此一決定將取決於非強制性式公民投票。

選址採用逐步分段計畫的原則，三個階段定義如下：

- 第一階段：選定適合的數個場址區域。
- 第二階段：選定至少兩處的候選場址，一個用於高放射性、長壽命中放射性廢棄物，另一個則用於低放射性廢棄物。
- 第三階段：決定處置場址及申請通用執照。

「地質處置選址分段計畫」清楚定義 Nagra 的責任與所扮演的角色。起始階段依據既有之技術/地質資訊，最後階段則依據後來取得之新資訊，Nagra 應提供建議並證明其建議符合各個階段之準則。選址的三個主要階段及 Nagra 在各階段主要責任摘述如下表。

表：選址的三個主要階段及 Nagra 在各階段主要責任

階段/重點	當地參與	Nagra 的責任
第一階段： 選定適合的數個場址區域  ■ 長期安全性評估 ■ 空間規劃狀況評估及決定應用於第二階段的評估方法  預計時程 2.5 年	■ 遭到影響的州、社區、鄰近國家之資料  ■ 民眾的資訊 ■ 設立州諮詢委員會	■ 依據現有的資訊，選出數個低放射性廢棄物及高放射性廢棄物適合處置區域 ■ 依要求，負責盡告知及回應問題 ■ 協助空間規劃相關評估方法的進行 ■ 開始進行現有空間規劃(土地利用計畫)之決策

<p>第二階段： 選定至少兩處的候選場址，一個用於高放射性、長壽命中放射性廢棄物，另一個則用於低放射性廢棄物</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 暫時性安全分析</li> <li>■ 特定場址處置系統佈置圖</li> <li>■ 空間及環境規劃</li> <li>■ 社經研究</li> </ul> <p>預計時程 2.5 年</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 增進地區參與</li> <li>■ 定期的資訊會議</li> <li>■ 州諮詢委員會</li> <li>■ 區域參與</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 針對每個地區，發展出至少一個特定場址處置系統佈置圖</li> <li>■ 執行暫時性安全分析</li> <li>■ 訂出環境影響評估需進行的項目及開始進行環境影響評估之準備工作</li> <li>■ 在相關州的參與的境況下，進一步發展與具體確定地表設施及所需基礎建設的位子及安排</li> <li>■ 取得空間規劃概念評估所需基本的資料；視需要協助社經研究</li> <li>■ 為每一類型的廢棄物處置場建議至少兩個候選場址</li> </ul>
<p>第三階段： 決定處置場場址</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 提供地球科學調查</li> <li>■ 詳細經濟研究</li> <li>■ 選定場址</li> </ul> <p>預計時程 2.5 年</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 定期資訊會議</li> <li>■ 州諮詢委員會</li> <li>■ 區域參與</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 視需要，對所選場址進一步調查</li> <li>■ 各個場址間的比較（選擇及建議一個場址）</li> <li>■ 長期安全分析</li> <li>■ 地區與州簽訂補償協定</li> </ul>
<p>申請通用執照</p> <p>預計時程 2.5 – 4.5 年</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 提供場址土地憑證</li> <li>■ 安全報告</li> <li>■ 環境影響評估</li> <li>■ 提交空間規劃同意報告書</li> </ul>

## 參、心得及建議

- 一、美國雅卡山最終處置計畫全壽命周期之成本估計，過去 10 年間調高了 1 倍多，從 1998 年為 436.9 億美元；2001 重估後調為 575.2 億美元；2008 重估後調為 961.8 億美元。預算不斷往上調整原因包括物價上漲、全球尚未有高放射性廢棄物最終處置設施可供成本估算參考、延役造成用過核燃料數量增加等因素。因此，本公司於「核能後端營運總費用估算與每度核能發電分攤率計算」中有關高放射性廢棄物之最終處置計畫成本估算，宜注意國外發展之經驗，充份考量工程準備金(Contingency)。
- 二、韓國於簡報結論時，強調用過核燃料及高放射性廢棄物之長期安全營運為未來持續使用核能之關鍵所在。本公司於推動「核一廠用過核燃料乾式貯存計畫」時，亦有相同之體認，臺北縣政府發函表達「拒絕台電核廢料、反對興建貯存場」、「核廢料限期移出臺北縣」等訴求，致使該計畫時程受到嚴重延宕，而核一廠被迫停機之可能性已大幅提高。因此，本公司用過核燃料或(及)高放射性廢棄物之長期安全營運，將攸關我國核能未來持續使用及發展之前景。
- 三、瑞士透過立法程序，設置放射性廢棄物處置專責機構、訂定「深層地質處置選址分段計畫」及相關機構之責任與義務。無論我國將來係採直接處置或再循環策略，均需最終處置場。因此，建議我國政府宜比照「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」，制訂高放射性廢棄物最終處置設施場址選址之立法程序，明訂選址程序及訂定政府機關、管制機關、執行機構之責任及扮演的角色，以順利推動我國境內用過核燃料或(及)高放射性廢棄物之處置計畫。
- 四、該國際會議為一個討論關於核子燃料循環「後端」之科學、技術、社會與法規等相關概念的研討會，出席者包括各核能主要國家高放射性廢棄物營運之政策制訂單位、管制機關、執行機構等，而研討的議題包含核廢料的產生、貯存、運輸、處理及處置等方面，與本處業務息息相關，建議將來繼續派員參加該會議，以汲取國外高放射性廢棄物之營運發展經驗，俾利我國高放射性廢棄物之營運計畫能與國際接軌。